

УДК 537.533.9:620.186

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА СВОЙСТВА  
ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti–6Al–4V, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО–  
ЛУЧЕВОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

А.В. Николаева<sup>1</sup>, А. Д. Тересов<sup>2</sup>

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н., Н.С. Пушилина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН,

Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3, 634055

E-mail: [philip371g@gmail.com](mailto:philip371g@gmail.com)

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF SURFACE MODIFICATION ON THE PROPERTIES OF  
Ti–6Al–4V TITANIUM ALLOY FABRICATED BY ELECTRON BEAM ADDITIVE  
MANUFACTURING**

A.V. Nikolaeva<sup>1</sup>, A.D. Teresov<sup>2</sup>

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., PhD, N.S. Pushilina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

<sup>2</sup>Institute of High Current Electronics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, Tomsk, 2/3

Akademicheskii ave., 634055

E-mail: [philip371g@gmail.com](mailto:philip371g@gmail.com)

**Abstract.** *In this work, the regularities of changes in the microstructure and hardness of samples of the Ti–6Al–4V alloy manufacturing by electron beam melting were established, depending on the surface modification. For this study, samples were made in the form of cylinders with a diameter of 8 mm and a height of 2 mm from a titanium alloy Ti–6Al–4V. The average particle size of the powder varied from 50 to 150 μm.*

**Введение.** Метод электронно–лучевого сплавления (ЭЛС), представляет собой образование последовательных слоев путем сплавления металлического порошка в вакуумной камере. Наиболее существенными преимуществами аддитивного производства (АП), являются снижение материальных потерь и времени производства изделия, изготовление легких объектов сложной геометрии без привлечения традиционных методов производства. Титановые сплавы обладают высокой прочностью, трещиностойкостью, низким удельным весом и поэтому широко используются в различных отраслях промышленности: аэрокосмической промышленности, медицине и мелкосерийном производстве.

Анизотропия свойств, специфика структуры и наличие специфических дефектов, обусловленных технологией аддитивного производства в материалах, могут оказывать существенное влияние на взаимодействие материалов с агрессивной средой. В настоящее время активно исследуются и развиваются методы постобработки изделий, полученных с помощью аддитивных технологий [1, 2]. В данных работах отмечается, что дополнительная обработка изделий позволяет повысить прочностные характеристики материалов, модифицировать микроструктуру и т.д.

Целью данной работы является исследование влияния модифицирования поверхности на свойства титанового сплава Ti–6Al–4V, изготовленного методом электронно–лучевого сплавления.

**Экспериментальная часть.** Изготовление образцов из порошка титанового сплава Ti–6Al–4V проводилось на установке электронно–лучевого сплавления ARCAM A2 EBM (Arcam AB, Мельндаль, Швеция) [3]. Средний размер частиц порошка варьировался от 50 до 150 мкм. Образцы имели форму цилиндров диаметром 8 мм и высотой 2 мм. Толщина слоя порошка составляла 70 мкм, использовались стандартные параметры печати для твердого Ti–6Al–4V: минимальный диаметр луча – 250 мкм, рабочий вакуум  $5 \times 10^{-4}$  мбар, область построения образцов: 200x200x380 мм, максимальная мощность луча 3 кВт, скорость перемещения электронного луча – 8000 м/с, диапазон температур процесса (600–1100) °С. Образцы были тщательно очищены в системе извлечения порошка ARCAM, далее они были подвергнуты механической шлифовке и полировке для получения однородной поверхности.

Для исследования влияния обработки поверхности на свойства образцов титанового сплава Ti–6Al–4V, часть из них была подвергнута обработке импульсным электронным пучком (ИЭП). Плотность энергии составила 25 Дж/см<sup>2</sup>, количество импульсов 3, длительность импульса 50 мкс. Обработка проводилась на установке СОЛО в Институте сильноточной электроники СО РАН. В данной работе микроструктуру образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии с помощью системы с электронным и сфокусированными пучками Quanta 200 3D в ТГУ. Измерение нанотвердости проводилось на нанотвердомере ННТ–ТТХ S при максимальной нагрузке 400 мН. Анализ данных наноиндентирования проводился методом Оливера–Фарра.

**Результаты.** Результаты исследования микроструктуры титановых образцов, изготовленных ЭЛС, до и после модифицирования импульсным электронным пучком представлены на рисунке 1. Видно, что  $\alpha$ –фаза ограничена зерном  $\beta$ –фазы, в которой хаотично расположены  $\alpha$ –пластины. Установлено, что микроструктура исходного титанового сплава Ti–6Al–4V, изготовленного методом ЭЛС, состоит из колоний  $\alpha$ –пластин в  $\beta$ –матрице. Обработка ИЭП с плотностью энергии 25 Дж/см<sup>2</sup> приводит к существенному изменению микроструктуры поверхности образцов. В результате высокоскоростного нагрева до температуры плавления и последующего охлаждения со скоростями порядка  $10^8$  К/с в поверхностном слое титанового сплава после обработки ИЭП формируются крупные зерна с мартенситными пластинами  $\alpha'$ –фазы.

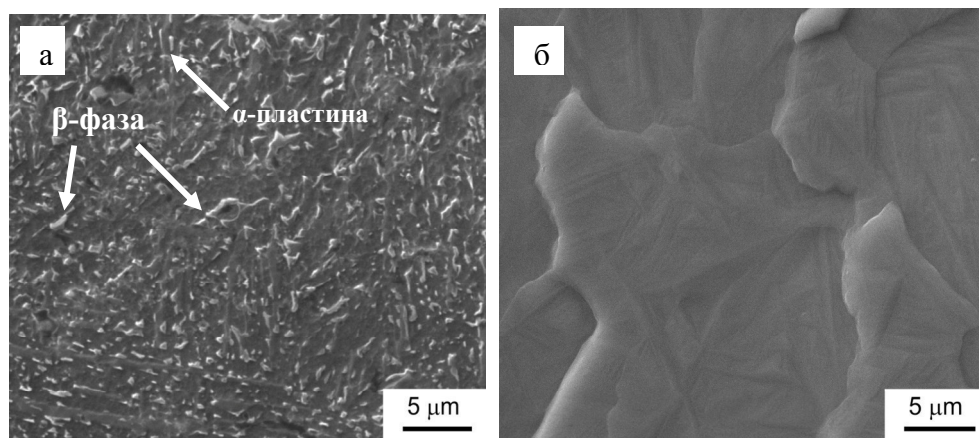


Рис. 1. СЭМ – изображения поверхности образцов, изготовленных методом ЭЛС, до (а) и после (б) модифицирования импульсным электронным пучком

На рисунке 2 представлены диаграммы нагружения для образцов титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом ЭЛС до и после модифицирования импульсным электронным пучком по результатам измерения нанотвердости. Видно, что глубина проникновения индентора в обработанном ИЭП образце, больше чем в исходном. В таблице 1 приведены результаты измерений нанотвердости образцов, а также модуля Юнга.

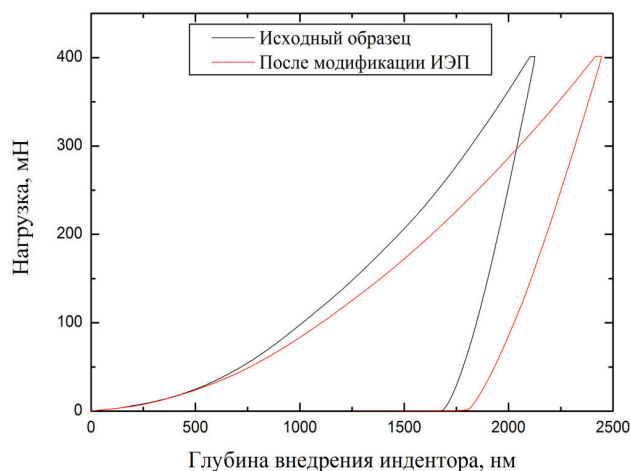


Рис. 2. Диаграммы нагружения для образцов титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного методом ЭЛС, до и после модифицирования импульсным электронным пучком

Таблица 1

Механические характеристики титанового сплава Ti-6Al-4V, изготовленного ЭЛС, до и после модифицирования ИЭП

Образцы	Нанотвердость $H$ , ГПа	Модуль Юнга $E$ , ГПа
Исходные	$5,45 \pm 0,24$	$122,45 \pm 2,74$
После ИЭП	$4,44 \pm 0,31$	$74,94 \pm 9,21$

**Заключение.** В работе исследовано влияние импульсного электронного пучка на свойства титанового сплава, изготовленного с помощью аддитивной технологии. Согласно проведенным измерениям, после модифицирования импульсным электронным пучком происходит уменьшение нанотвердости образцов на 19 %. Установлено, что в результате воздействия ИЭП происходит изменение микроструктуры образцов. Модифицирование ИЭП приводит к уменьшению твердости поверхности исследуемых образцов, возможно, это связано с отжигом дефектом и снятием внутренних напряжений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин А. В. и др. Изменение структуры поверхностных слоев технического титана в процессе обработки низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117., №. 6. – С. 571–571.
2. Panin A. et al. Surface modification of 3D-printed Ti-6Al-4V parts by continuous electron beam // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2018. – V. 2051., No. 1. – P. 020225.
3. Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion // ASTM F2924-14, 2014. – 9 p.